Acoustic system for monitoring and control of manufacturing processes

Schallbasiertes System zur Prozessüberwachung und –regelung von produktionstechnischen Fertigungsverfahren

Autor: Oliver Georgi; Hendrik Rentzsch

Institution: Fraunhofer-Gesellschaft; Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU

Datum: 2019-01-17

Abstract
Process monitoring and control is used to enhance reliability of manufacturing processes and to increase productivity through running a process close to limits of stability. The suitability of these systems depends on the quality of the processed sensor signals and thereby directly on the distance between the location of measurement and the process zone. The invention presents a new approach using the additional emission of sound waves to carry process information. Furthermore the sensor module is shown and related physical phenomena are explained.

Kurzfassung
Methoden zur Prozessüberwachung und –regelung von produktionstechnischen Fertigungsverfahren werden verwendet um die Prozesssicherheit zu steigern und gleichzeitig eine Produktivitätssteigerung bis an die Stabilitätsgrenzen zu erzielen. Dabei hängt in der Praxis die Zuverlässigkeit und Qualität eines solchen Überwachungssystems direkt von der Signalgüte und damit vom Abstand der verwendeten Sensorik zur Wirkstelle des Prozesses ab. Die Erfindung stellt ein neuartiges System vor, welches aktiv in die Prozesszone eingebrachte Schallschwingungen als Informationsträger für Prozesssignale nutzt. Neben dem Sensormodul werden die zu Grunde liegenden physikalischen Wirkmechanismen vorgestellt.

Keywords
Process monitoring, process control, sound, ultrasound, acoustics

Schlagworte:
Prozessüberwachung, Prozessregelung, Schall, Ultraschall, Akustik

In der modernen Fertigungstechnik spielt die Prozessoptimierung beispielsweise mit dem Ziel der Produktivitätssteigerung bis an die Stabilitätsgrenzen eine übergeordnete Rolle. Gleichzeitig nehmen die Anforderungen an die Maschinen und Fertigungsprozesse durch neue Werkstoffe, den hohen Automatisierungsgrad und höhere Bearbeitungsgenauigkeiten weiter zu. Ein großes Potential zur Verbesserung der Leistungsfähigkeit der Verfahren bieten Methoden zur Prozessüberwachung und -regelung. Dabei werden während der Bearbeitung Prozessgrößen überwacht und Zustände des Prozesses identifiziert. Auf Basis dieser Informationen wird regelungstechnisch eingegriffen. um hinsichtlich definierter Zielkriterien wie Genauigkeit oder Produktivität zu optimieren.

In der Wirkzone oder auch Prozesszone der produktionstechnischen Fertigungsverfahren findet eine gezielte Beeinflussung des Materials statt. In der Regel herrschen dort extreme Bedingungen wie zum Beispiel hohe Relativgeschwindigkeiten. Kräfte, Drücke. Spannungen oder Temperaturen sowie begrenzte Platzverhältnisse. Deshalb ist die direkte Erfassung von Prozessinformationen bzw. Messwerten direkt aus der Wirkzone In der Regel nicht möglich.
Neben den Prozessparametern sind aber speziell diese Größen für die Stabilität und Qualität bestimmend. Deren inhärentes Auftreten in der Prozesszone und das Bestreben einer Online-Messung ohne Unterbrechung des Bearbeitungsprozesses beispielsweise beim Werkzeugverschleiß führt zur Anforderung Kenngrößen prozessparallel direkt aus der Prozesszone zu ermitteln. Diese sind in geeignet um die spezifischen Mechanismen und somit den Prozesszustand selbst zu charakterisieren und aufbauend darauf regelungstechnisch Einfluss zu nehmen. Aufgrund der Wechselwirkung der Prozessgrößen mit der Umgebung werden indirekte Messgrößen verwendet. um z.B. anhand von Modellen auf diese Kenngrößen zu schließen. Das derzeitige Spektrum an verfügbaren Methoden ist in vielen Fällen nicht ausreichend. um eine zuverlässige Prozessüberwachung und -regelung zu realisieren.
Gegenstand der Erfindung ist ein neuartiges System zur Prozessüberwachung und -regelung. welches die Prozesszustände auf Basis von zusätzlich induzierten Schallwellen ermittelt Spezifische Effekte und Prozessgrößen können durch das Verhalten der induzierten Schallwellen bzw. Schwingungen bei der Interaktion mit dem Prozess in der Wirkzone identifiziert und charakterisiert werden. Durch die Überwachung und Regelung des Bearbeitungsprozesses wird die Reproduzierbarkeit und Prozessstabilität gesteigert. Weiterhin können höhere Werkzeugstandzeiten sowie Leistungsparameter realisiert werden. Störgrößen wie Werkzeugverschleiß können überwacht und zusätzlich Schadensereignisse wie beispielsweise ein Werkzeugbruch erkannt bzw. sogar verhindert werden.

Für die allgemeine Überwachung von Fertigungsprozessen gibt es verschiedene Ansätze. welche hier beispielhaft vorgestellt werden. Vorrangig werden indirekte Größen verwendet, um Rückschlüsse auf das Prozessverhalten zu ziehen. Die Überwachung mit Hilfe von indirekten Größen setzt allerdings einen eindeutigen Signalpfad und ausreichend hohe Amplituden voraus. Die ermittelten Informationen aus den Messwerten müssen eindeutig auf den Prozess selbst zurückzuführen sein. Deshalb sind potentielle Störgrößen auf dem Übertragungspfad zu beachten. Bel Prozessen mit geringen Signalamplituden. hoher Dynamik und oder langen Übertragungspfad zum Messpunkt geht die Prozesscharakteristik im Rauschen unter. wird durch die Übertragungsstrecke und Störgrößen verfälscht oder die relevanten Informationen gehen verloren. Eine Auswertung des Signals zum Zweck der Analyse der Prozessgrößen ist dann nicht mehr möglich.
Eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung des Prozesszustands ist die Prozesskraft und deren zeitlicher Verlauf. auf dessen Basis unter anderem der Werkzeugverschleiß beim Bohren (1) überwacht oder eine Optimierung des Spanvolumens durch leistungsabhängige Regelung beim Drehen (1.3) realisiert werden kann. Zur Ermittlung der Prozesskraft wird die Belastung in Form von Kräften, Momenten oder Verlagerungen am Werkzeug oder umliegenden Maschinenkomponenten gemessen. Darüber hinaus wird der Motorstrom bzw. die Leistungsaufnahme von Haupt- oder Vorschubantrieben verwendet, um Rückschlüsse auf die Prozesskräfte zu ziehen (2). Problematisch bei der kraftbasierten Prozessüberwachung ist die Übertragungsstrecke zur Messstelle. Betragsmäßig kleine

Prozesskräfte und Änderungen sowie hochfrequente Signale lassen sich mit dieser Methode nicht zuverlässig auswerten. Auch die Integration von Beschleunigungssensoren im Bereich von Maschinenkomponenten wie der Werkzeugspindel zur Erkennung von Werkzeugbruch (2,10) oder Rattern [2,10] sind Stand der Technik. Ein weiterer Ansatz zur Prozessüberwachung ist die Auswertung von Körperschallschwingungen. die Schallemissionsprüfung (AE - Acoustic emission testing). Diese beruht auf dem Ansatz, dass bei bleibender Deformation zum Beispiel dem Entstehen eines Mikro- oder Makrorisses Im Material beim Zustandsübergang akustische Signale emittiert werden (4,5). E.s handelt sich dabei um ein passives System, welches die emittierten Signale von Werkstück, Werkzeug bzw. Prozess zur Überwachung der Prozesszustände nutzt. Anwendung erfahren solche Systeme bei der Werkzeugbruchüberwachung, weil in der Regel kurz vor dem Bruch und während des Bruchs selbst charakteristische hochfrequente Schallsignale ermittelt werden - Weitere Anwendungen auf Basis von emittierten Körperschallsignalen sind die Überwachung von Werkzeugverschleiß beim Bohren [5], die Abrichtüberwachung beim Schleifen [2,6] sowie die Überwachung diverser umformtechnischer Verfahren (7).
Ein bekanntes Verfahren zur Nutzung von aktiv eingebrachtem Schall Ist die Ultraschallprüfung im Rahmen der Qualitätsprüfung von Bauteilen. Hierbei werden Ultraschallschwingungen in das Bauteil abgestrahlt und an gleicher Stelle über einen Empfänger die Antwort des Schallsignals ausgewertet. Sind im Bauteil Risse enthalten, reflektieren diese die induzierte Schwingung. Über eine Laufzeitmessung wird schließlich auf den Ort bzw. die Tiefe der Fehlstelle geschlossen. Hierbei handelt es sich explizit nicht um eine Prozessüberwachung oder -regelung sondern um eine Qualitätsprüfung der Bauteile, welche sowohl innerhalb (8] als auch außerhalb [8] der herstellenden Werkzeugmaschine stattfinden kann.
Neben den Regelungssystemen innerhalb der Werkzeugmaschinen selbst kommen zunehmend Fertigungsverfahren mit Prozessregelung zum Einsatz, um die Prozessführung zu optimieren. Über den geschlossenen Regelkreis werden die relevanten Größen für den Prozessverlauf erfasst und mit Sollwerten verglichen. Entsprechend der Regelabweichung werden schließlich die Regelgrößen konstant gehalten. Ziele sind beispielsweise eine schwingungsfreie Bearbeitung, eine konstante Nutzung der Maschinenleistung und vieles mehr. Anwendungen finden sich dabei sowohl zur automatischen Schnittaufteilung beim Drehen [2,9], der Ratterbeseitigung beim Fräsen [2] beim Tiefbohren und anderen Verfahren.
Die statistische Prozessregelung [2] basiert nicht auf den inhärenten Prozessgrößen sondern auf den Qualitätsmerkmalen des bearbeiteten Werkstücks. Es werden online In der Werkzeugmaschine selbst oder nachgelagert in einer Messmaschine geometrische Merkmale bestimmt und Abweichungen von den Sollwerten über eine Kompensation z.B. über Korrekturfaktoren im NC-Programm für nachfolgende Werkstücke ausregell. Basis ist demnach nicht der Fertigungsprozess mit den Prozessgrößen und stochastischen Einflüssen sondern die Qualität des Werkstücks. Die Regelung erfolgt innerhalb der Taktzelt.

Das Verfahren beschreibt den Aufbau und Funktionsweise eines Systems zur Prozessüberwachung, welches optional um eine Prozessregelung erweitert werden kann. Zentrale Alleinstellung ist das gezielte Einbringen einer zusätzlichen Schallschwingung, welche durch die Prozesszone verläuft. Oie Kennwertbildung basiert auf der Auswertung des Schallsignals nach der Interaktion mit dem Bearbeitungsprozess sowie der Möglichkeit der korrelierenden Auswertung mit den Eigenschaften der eingebrachten Schwingung sowie deren zeitlicher Änderung. Zusätzlich können weitere Parameter aus der

Maschinensteuerung und in die Kennwertbildung bzw. Merkmalserfassung sowie in die Klassifikation, Diagnose und Regelungsarchitektur einfließen. Grundlegend besteht das System zur Prozessüberwachung und --regelung aus den Modulen: Sensormodul, Überwachungsmodul, Reaktionsmodul, Bedieneinheit sowie in der Regel einer optionalen Schnittstelle zur Maschinensteuerung. Dabei kann das System alleinstehend (Abbildung 1), aber auch sowohl komplett als auch nur über die Bedienung und Visualisierung in die Maschinensteuerung integriert sein.
Zentraler Kern der Erfindung ist das neuartige Sensormodul, welches aus mindestens einem Sender und Empfänger besteht. Verschiedene Varianten zur Anordnung des akustischen Sensormoduls sind in Abbildung 2 dargestellt. Der jeweilige Aufbau des Sensormoduls wird Anforderungsgerecht ausgelegt und entspricht entweder einer der Varianten oder einer Kombination daraus. Zur Anregung der mechanischen Schwingungen wird ein Sender verwendet, der aus einem elektromagnetischen Energiewandler einem sogenannten Transducer besteht. Dafür kann unter Anderem ein piezoelektrischer oder magnetostriktiver Aktor eingesetzt werden. Der Sender kann dabei sowohl auf der Werl<zeugseite im Werkzeug (1) bzw. der Werkzeugaufnahme (2) oder Werkzeugspindel (3) als auch auf der Werkstückseite am Werkstück (4). den Spannvorrichtungen (5), dem Maschinentisch (6) oder wenn vorhanden der Werkstückspindel (7) angeordnet bzw. integriert sein. Darüber hinaus können die Schwingungen je nach Anwendungsfall mit unterschiedlichen Frequenzen eingebracht werden. Für viele Anwendungen ist eine Anregung mit spezifischen Eigenfrequenzen des Systems bzw. der Systemkomponenten von besonderem Interesse. Hier ist als Beispiel die Schwingungsanregung der longitudinalen Eigenschwingform des Werkzeugs zu nennen. Oie auszuwertenden akustischen Schwingungen können sowohl am Festkörper als Körperschall, aus Fluiden als auch als Luftschall erfasst werden. Oie exakte Auswahl der Messaufnehmer bzw. Sensoren ist vom spezifischen Prozess, dessen Eigenschaften sowie der induzierten Schwingung abhängig. Die Aufnahme des Luftschalls erfolgt durch ein Mikrophon oder Mikrophon-Array, welches im Arbeitsraum der Maschine (8) angeordnet wird. Oie Aufnahme der Schwingung aus dem Fluid wird Ober ein Hydrophon (9) realisiert. Als Fluid für die Schwingungsübertragung bietet sich vor allem das Schmier- bzw. Kühlmedium des Bearbeitungsprozesses an. Oie messtechnische Erfassung der Schwingung am Festkörper erfolgt über Beschleunigungsaufnehmer, Körperschallsensoren oder AE-Sensoren. Eine äquivalente Verwendung von Dehnungs- oder Kraftsensoren ist ebenfalls möglich. Für den Empfänger kommen identisch zum Sender die Werkzeugseite mit Werkzeug (10) bzw. Werkzeugaufnahme (11) und wenn vorhanden Werkzeugspindel (12) als auch an der Werkstückseite das Werkstück (13), die Spannvorrichtungen (14), der Maschinentisch (15) oder wenn vorhanden der Werkstückspindel (16) in Frage. Wenn das Messen über Körperschall realisiert wird, gibt es zusätzlich die Möglichkeit Sender- und Empfangsfunktion in einem Bauelement zu vereinen. Sowohl das Senden als auch das Empfangen können entweder kontinuierlich, intermittierend oder situativ auf Anforderung ausgeführt werden. Neben den Informationen über die resultierende Schwingung aus der Interaktion mit dem Prozess besteht die Möglichkeit Signale der induzierten Schwingung in die Auswertung einzubeziehen. Zusätzlich zur beschriebenen akustischen Einheit, welche die Basis der eigentlichen Erfindung widerspiegelt, kann das Sensormodul bei Bedarf mit weiteren Sensoren zum Beispiel zur Störgrößenerfassung entsprechenden dem Stand der Technik zum Beispiel mit Temperatursensoren erweitert werden. Darüber hinaus können durch eine Schnittstelle zur Maschinensteuerung dort vorhandene Daten, Signale und Maschinenzustände In das anschließende Mustererkennungsverfahren einnießen.

An dieser Stelle wird zusätzlich explizit auf die Anwendung bei schwingungsüberlagerten Bearbeitungsprozessen eingegangen, bei denen der konventionellen Prozessklnematik eine zusätzliche Schwingung iJber1agert wird (11). Diese wird verwendet, um die grundlegenden Mechanismen des Fertigungsprozesses, zum Beispiel die Spanbildung bei der Zerspanung von duktilen Werkstoffen oder das Fließverhalten beim Tiefziehen, gezielt zu beemnussen unterteilen lassen sich die schwingungsüber1agerten Bearbeitungsprozesse nach dem Frequenzbereich der Schwingung in den niederfrequenten Bereich und hochfrequenten bzw Ultraschallbereich Bei ultraschallunterstützten Bearbeitungsprozessen wird 1n der Regel eine resonante Anregung des Werkzeugsystems zur Erzeugung der notwendigen Schwingung hoher Amplitude genutzt. Eine Vielzahl von Aufbauprinzipien einer solchen Aktorik zur Erzeugung des Ultraschalls sind patentiert (12-28) und nicht Bestandteil der Erfindung. DarOber hinaus kommen Systeme zur aktorseitigen Regelung von Anregungsfrequenz und -amphtude zum Einsatz. Die dargestellte Erfindung schließt expliZJt die Anwendung bei schwingungsüber1agerten Prozessen ein. Wobei die erzeugten Schwingungen zur Prozessbeeinnussung kombiniert als Sender im Sinne des dargestellten Sensormoduls genutzt werden können. Die Erfindung ist demnach ebenfalls geeignet um eine Prozessüberwachung und -regelung für derartige Prozesse speziell für die Erfassung deren spezifischer Effekte In der Prozesszone zu etablieren. Beispielsweise ist eine Überwachung und Regelung des Schwingsystems auf Basis von Informationen des tatsächlichen Schwingverhaltens der Werkzeugspitze unter Prozesseinnuss bisher nicht möglich. (29) erfasst ein Sensorsignal der Schwingungsanregung im Aktorstack eines Ultraschallsystems zur Unterstützung der spanenden Bearbeitung. Dieses wird für die Regelung des Ultraschall-Schwingsystems verwendet und kommt nicht zum Zweck der Prozessüberwachung und -regelung zum Einsatz. Damit können insbesondere lokale Eigenschwingformen des Werkzeugs, an denen der Aktorstack nicht beteiligt Ist. nicht nachvollzogen werden. (30) beschreibt zusätzlich ein Verfahren zur Bestimmung der Frequenzkennlinie eines solches Systems. (31) beschreibt ein solches System, wobei übe die Auswertung der Resonanzfrequenz während des Betriebs Materialänderungen detektiert und der Bearbeitungsprozess an diese angepasst wird.

Grundlegende Wirkprinzipien

Die Zustandserfassung für die Prozessüberwachung und -regelung basiert auf drei grundlegenden und neuartigen W1rkpnnZJpien (Abbildung 3), welche genutzt werden, um Informationen aus der Prozessstelle zu gewinnen und somit den Prozesszustand zu identrfizieren.
Das erste PnnZJp basiert auf der Veränderung des Transmissionsverhaltens der Induzierten Schwingung durch die Prozessstelle und deren inhärente physikalische Eigenschaften (Abbildung 3a). Dies geschieht insbesondere an Materialübergängen bzw. Kontaktstellen bedingt durch die unterschiedlichen akustischen Impedanzen aber auch zum Beispiel durch Relativbewegungen. Beispielsweise ändert sich das Transmissionsverhalten in Abhanglgkeit des Schmierzustands in der Wirkzone. Außerdem können dadurch prozessinteme Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück ausgewertet werden.
Ein weiteres Wirkprinzip basiert auf der Modulation des Erreger- bzw. Sendersignals durch die akustischen Wellen aus der Wirkzone (Abbildung 3b). Insbesondere bei hochfrequenten induzierten Schwingungen wird die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Senderslgnals durch niederfrequentere Schwingungen in der Prozessstelle beeinnusst. Resultat ist die Modulation

der niederfrequenten Schwingungen auf die hochfrequente Trägerschwingung in Form von Seitenbändern im Frequenzspektrum. Durch die Auswertung der Seitenbänder ist es möglich, Informationen über auftretende Schwingungen in der Prozessstelle zu gewinnen. Störschwingungen können beispielsweise beim Rattern oder bei ultraschallgestützten Prozessen auftreten.

Das dritte Prinzip bezieht sich auf die lnduzierung von resonanten Schwingungen durch den Sender. Die Ausprägung der Eigenmoden und Eigenfrequenzen ist eine Systemeigenschaft. welche durch Kopplung mit anderen Systemen entscheidend beeinflusst wird. So verändern sich die Eigenschaften des werkstückseitigen und werkzeugseitigen Systems durch deren Kopplung über den Bearbeitungsprozess signifikant (Abbildung Je). Gleichzeitig beeinflussen die spezifischen physikalischen Eigenschaften dieser Kopplung wiederum die beteiligten Schwingsysteme. Wird deren Verhalten prozessparallel ausgewertet, lassen sich Informationen über die Kopplung also über den Bearbeitungsprozess selbst gewinnen. Ein Beispiel ist die resonante Erregung des Bearbeitungswerkzeugs mit dem Sendersignal. Der Prozess beeinflusst das dynamische System zum Beispiel hinsichtlich einer Steigerung der Eigenfrequenz des betreffenden Eigenmodes gegenüber dem freien Zustand. Über die Höhe dieses Anstiegs lassen sich bei konstanten Prozessparametern beispielsweise Rückschlüsse über den Werkzeugverschleiß oder die Belastung des Werkzeugs ziehen.

Überwachungsmodul

Im Überwachungsmodul wird der Prozesszustand durch ein System der Mustererkennung aus den zu Verfügung gestellten Messgrößen identifiziert. Der grundlegende Aufbau entspricht dem Stand der Technik (Abbildung 4). Die verwendeten Algorithmen zum Signalprocessing, Merkmalsberechnung bzw. Kennwertbildung, Klassifikation und Diagnose sind abhängig von der spezifischen Anwendung und werden explizit für diese angepasst. Entscheidend Ist außerdem, welche Prozesszustände betrachtet werden und welche der dargestellten Wlrkprinzlplen für den jeweiligen Anwendungsfall zum Einsatz kommen.
In Abhängigkeit der Wlrkprinziplen können jedoch einige beispielhafte Aussagen zusammengefasst werden. Bei der Untersuchung des Transmissionsverhaltens sind Auswertungen im Zeitbereich zum Beispiel für Laufzeitmessungen oder Phasenauswertung zielführend. Dazu Ist eine korrelierte Auswertung von Daten der Sende- und Empfangseinheit notwendig. Des Weiteren können Schwingungsamplituden sowie Energiebilanzen und Leistungspegel breitbandig oder auf den Frequernzbereich des Sendersignals fokussiert zur Kennwertbildung herangezogen werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Auswertung der resultierenden Schwingform. Das Transmissionsverhalten der Induzierten Schwingung kann insbesondere zur Identifikation von Prozesszuständen abhängig von den Kontaktbedingungen in der Prozesszone verwendet werden. Beispiele sind der Schmierzustand, der lokale Kontaktstatus zwischen Werkzeug und Werkstück sowie Werkzeugverschleiß.
Wird das Prinzip der Modulation für die Mustererkennung benutzt, ist eine Merkmalsberechnung auf Basis des Frequenzbereichs zietführend. Im Spektrum bilden sich die Seitenbänder eindeutig ab. Möglichkeiten zur spektralen Betrachtung sind die Verwendung von entsprechenden Transformations-Algorithmen wie beispielsweise der Fourier-. Wavelet, Laplace- oder Gabor-Transformation. Die Auswertung ermöglicht Schwingungen In der Prozessstelle zum Beispiel zur Rattererkennung zu identifizieren.

Außerdem ist es möglich. bei ultraschallgestützten Bearbeitungsprozessen tatsächliche Werkzeugschwingungen in der Prozessstelle und somit auch das Abhebeverhalten sowie das Auftreten von Störschwingungen zu überwachen.
Auch für die Auswertung der Kopplung resonanter Systeme gibt es verschiedene Möglichkeiten zur Umsetzung. Es besteht die Möglichkeit Frequenzbänder mit dem Sender abzufahren und durch den Empfänger Frequenzgänge durch die Prozessstelle aufzunehmen und auszuwerten. Auch eine kombinierte Nutzung des Senders als Empfänger ist praktikabel, wenn dieser über eine Frequenzregelung (z.B. Phase-Lock-Loop PLL) zu jedem Zeitpunkt eine ausgewählte Eigenform anregt. Hier kann die Änderung der Resonanzfrequenz aber auch die elektrische Impedanz oder Leistung als Kennwert für eine Grenzwertbetrachtung oder Trendanalysen herangezogen werden, um beispielsweise den Werkzeugverschleiß oder Werkzeugbruch zu überwachen.

Prozessregelung

Aufbauend auf dem Sensormodul und der Prozessüberwachung wird über eine Regelung aktiv in den Prozess eingegriffen (Abbildung 5). Die Architektur der Regelung als optionaler Baustein der Erfindung ist wie die Prozessüberwachung bzw. das Überwachungsmodul stark von dem spezifischen Anwendungsfall abhängig und orientiert sich am Stand der Technik. Die Regelung kann sowohl direkt über entsprechend ausgeführte Schnittstellen als auch indirekt über die Maschinensteuerung in den Prozess eingreifen. Dabei können sowohl kontinuierliche als auch intermittierende und situative Maßnahmen eingeleitet werden. Potentielle Stellgrößen sind die Prozessparameter selbst sowie bei schwingungsüberlagerten Prozessen die Parameter des Schwingsystems.

Die Wirkungen und Vorteile das neu entwickelte Sensorkonzept

Das Schallbasiertes System inklusive des Sensormoduls als Kern des Verfahrens ist ein Enabler zur Nutzung der neuartigen Wirkprinzipien für eine Prozessüberwachung und -regelung von produktionstechnischen Fertigungsverfahren. Dadurch ist es möglich sowohl bisher nicht erfassbare Prozesszustände zu identifizieren (z.B. Schwingungen in Prozessstelle bei ultraschallgestützten Bearbeitungsverfahren) als Überwachungssysteme für bisher ungeeignete Verfahren (z.B. Mikrobearbeitungsverfahren) zu etablieren.
Mit Hilfe der Prozessüberwachung und -regelung wird die Reproduzierbarkeit und Prozesssicherheit gesteigert und insbesondere bei steigendem Automatisierungsgrad der Produktionssysteme die Leistungsfähigkeit moderner Fertigungsprozesse deuUich gesteigert.
Im Rahmen der Prozessentwicklung und Auslegung steht ein zusätzliches Werkzeug zur Verfügung, um den Prozess anhand der auftretenden Prozesszustände und Effekte, welche durch das System transparent und quantitativ ausgewertet werden, gezielt auszulegen.
Weitere Vorteile sind die Anfertigung von Fertigungsprotokollen mit Prozessdaten für zum Beispiel sicherheitsrelevante Bauteile oder die Möglichkeit der prozessdatenbezogenen Fernwartung von Produktionssystemen bzw. Prozessketten.

Literaturquellen

(1] Biermann. D.: Heilmann, M.: Prozessgestaltung für das Mikrotiefbohren. wt Werkstatts-technik online. 2010, Vol. 100, Nr. 11/12; S. 853-859

[2] Weck, M./ Brecher. C.: Werkzeugmaschinen 3. Mechatronische Systeme. Vorschubantriebe, Prozessdiagnose„ neu bearb. Auflage. Berlin/ Heidelberg: Springer, 2006

(3] N.N.: Maschinendiagnose in der automatisierten Fertigung. Industrie-Anzeiger. Jahrgang Nr. 62. 1981

(4) Schehl, U.: Werkzeugüberwachung mit Acoustic Emission beim Drehen, Fräsen und Bohren. Diss„ RWTH Aachen, 1991

(5) Klein. L.; Richter, S.: Prozessüberwachung mit Körperschall optimiert das Bohren tiefer Löcher. MM Maschinenmarkt, 2007

[6] N.N.: Vorrichtung zur Überwachung von Bearbeitungsprozessen. Europäische Patentanmeldung Nr. 0446849A2 der Fa. Dittel GmbH, 1991

[7] Böhm, V.: Beitrag zur Beurteilung von transienten Präzisionsschmiedevorgängen mittels Körperschall- und Schallemisslonsdlagnostlk, Dissertation, Berichte aus dem IW. Garbsen: PZH Verlag, 2013

(8) Deutsch, V.: Platte, M.: Vogt, M.: Ultraschallprüfung - Grundlagen und industrielle Anwendung. Berlin/Heidelberg: Springer 1997

(9) Gleseke. E.: Adaptive Grenzregelung mit selbsttätiger Schnittaufteilung für die Drehbearbeitung. Diss„ RWTH Aachen, 1973

(10) Schehl. U. und u. a.: Abschlußbericht des Verbundprojektes .Sicherung des spanabhebenden Bearbeitungsprozesses•. KfK-PFT. Jahrgang 154. April 1990

(11) Brehl, D. E.: Dow, T. A.: Review of vibralion-assisted machining. Precision Engineering. 2008. Vol. 32. Nr. 3. S. 153-172

(12) Schutzrecht: Cattani. C.: Apparatus for the dynamical balancing of a rotating body. Mar-poss S.P.A. 27.08.1996. US. VeröffenUichungsnr. US5549019 A

(13) Schutzrecht: Fiebelkom, F. : Stadeler, P. ; Fankhauser, T.: Werkzeugeinheit zur ultraschall-unterstützten rotativen Bearbeitung, Fritz Studer AG. Anmeldenr. EP20040405770. 14.06.2006. EU. Veröffentlichungsnr. EP1669148A1

(14) Schutzrecht. Miwa, Yuji ; TAKABAYASHI, Hideki: Ultraschallmaschine und Ultraschallbear-beitungsverfahren. Anmeldenr. DE19914104350, Deutschland. 22.08.1991. Deutschland. Veröffentlichungsnr. DE4104350 A 1

(15) Overcash, Jerald L.; Citlino, James F.: Development of a tunable ultrasonic vibration-assisted diamond turning instrument, Proceedings of ASPE 18th Annual

Meeting, 2003
(16) Pe1, Z. J.; Ferreira, P. M.: Modeling of ductile-mode material removal in rotary ultrasonic machining, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2008, Vol. 38, Nr. 10-11, S. 1399-1418
(17) Shamoto, E.; Suzuki, N.; Moriwaki, T.; Naoi, Y.: Development of Ultrasonic Elliplical Vibration Controller for Elliplical Vibration Cutting, CIRP Annals • Manufacturing Technology, 2002, Vol. 51 , Nr. 1, S. 327-330
(18) Spur, G.: Holl, S.-E .: Ultrasonic assisted grinding of ceramics, Journal of Materials Proces-sing Technology, 1996, Vol. 62. Nr. 4, S. 287-293
(19) Schutzrecht: Suzuki, H. , Sakamoto, Y. Monna, K.: Ultraschallschwingungsvorrichtung zur Ultraschallbearbeitung, Fuji Ultrasonic Engineering Co. 30.08.2001 . Deutschland. Ver-öffenllichungsnr. DE10108575 A1
(20) Neugebauer, R.; Stoll, A.: Ullrasonic applicalion in drilling, Journal of Materials Processing Technology, 2004, Nr. 149, S. 633-639
(21) Schutzrecht: Sauer, H.: Schwingkopf-Werkzeug. Patentnummer EP 1 763 416
(22) Ketelaer, J.; Feucht, F.; Werner, T.; Wolf, A.: Schwingende Werkzeuge: UL TRASONIC unterstützte Bearbeitung von Advanced Materials, In Tagungsband: 3. International Chemnitz Manufacturing Colloquium 08.-09.04.2014
(23) Schutzrecht: Neugebauer, R.; Stoll, A; Schneider. F.: Werkzeughalleeinrichtung und Werkzeugmaschine mit einer Werkzeughaltevorrichtung, insbesondere zum Tieflochbohren, Fraunhofer-Gesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 10.07.2008 Deutschland, Patentnummer: DE 102004056716 64
(24) Schutzrecht. Rescher, H.-J.; Rennau. A.; Stoll, A.: Werkzeughalter an einer Werkzeugmaschine und Bearbeitungsverfahren eines Werkstücks, FraunhoferGesellschaft zur Förderung der angewandten Forschung e.V., 19.09.2013, Deutschland, Patentnummer: DE 102008052326 64
(25) Schutzrecht: Sauer, H.: Schwingkopf-Werkzeug, Sauer GmbH, 21 .05.2008, Europa, Patentnummer: EP 1763416 81
(26) Schutzrecht: Pucher, H.-J.; Schwenk, G.: Schnittstelle für einen Werkzeugaktor bzw. für ein Werkzeug, insbesondere zum Verbinden mit einer Werkzeugmaschine, Sauer Ultrasonic GmbH, 16.11.2016. Europa, Patentnummer: EP 2408580 81
(27] Geändertes Schutzrecht: Pucher, H.-J.; Schwenk, G.: Schnittstelle für einen Wentzeugaktor bzw. für ein Werkzeug, insbesondere zum Verbinden mit einer Werkzeugmaschine
(28) Schutzrecht: Hessenkämper, A.; Pucher, H.-J„: Wentzeugmaschine, Wentstückbearbeitungsverfahren, 15.10.2010, Deutschland, Patentnummer: DE

10201004863884
(29) Offenlegungsschrift: Ketelaer, J.: Vorrichtung zur Erzeugung einer Ultraschallschwlngung eines Werkzeugs und zur Messung der Schwingungsparameter, 12.01 .2017, Deutschland, Nummer: DE 102015212810A1
[30) Offenlegungsschrift: Ketelaer. J .: Verfahren und Vorrichtung zur Bearbeitung eines Werkstücks an einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine. 08.02.2018, Deutschland, Nummer: DE 10 2016 214 699 A1
(31) Schutzrecht: Kuenen. H.J.: Verfahren und Vorrichtung zum Bestimmen der Frequenzkennlinie und zum Betreiben eines Ultraschallwerkzeugs. 26.11.2015, Deutschland, Patentnummer: DE 102007013055 B4

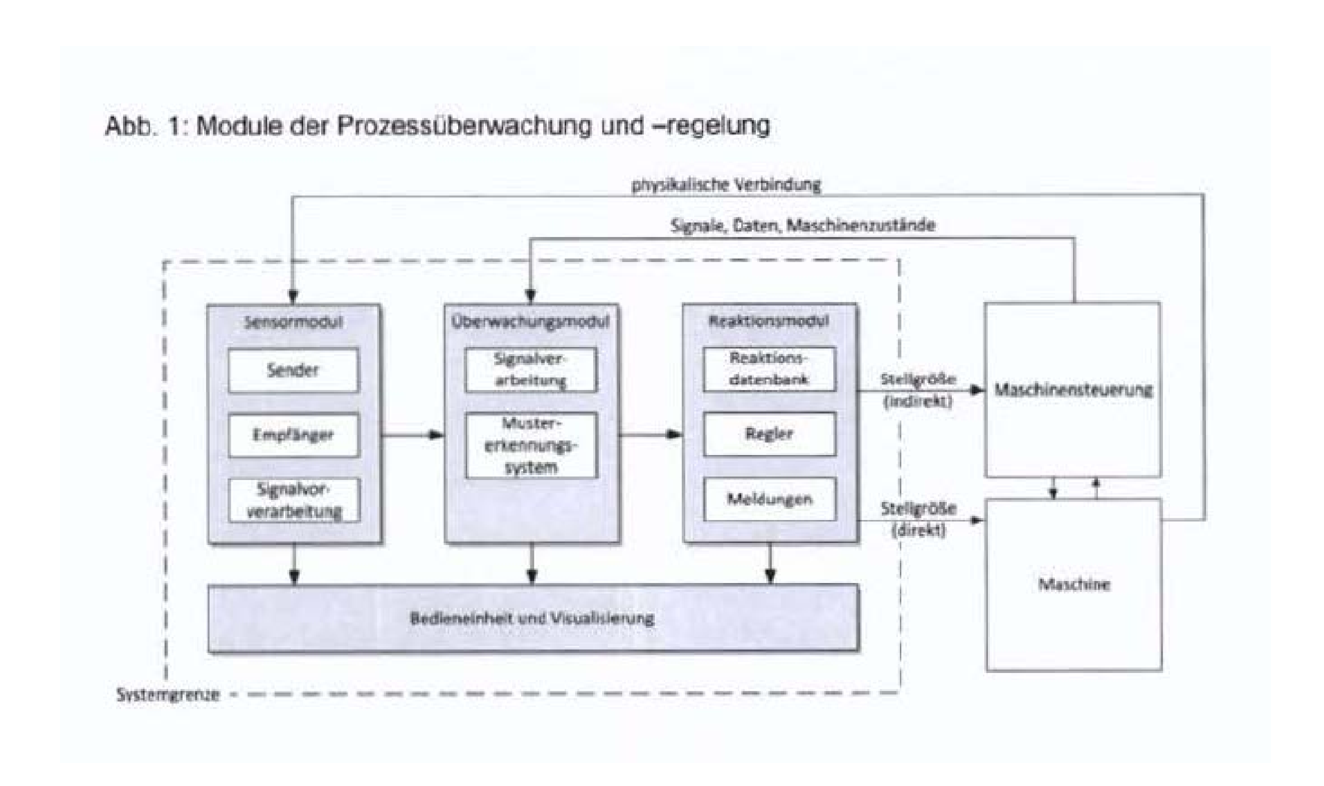


Abb. 1: Module der Prozessüberwachung und –regelung

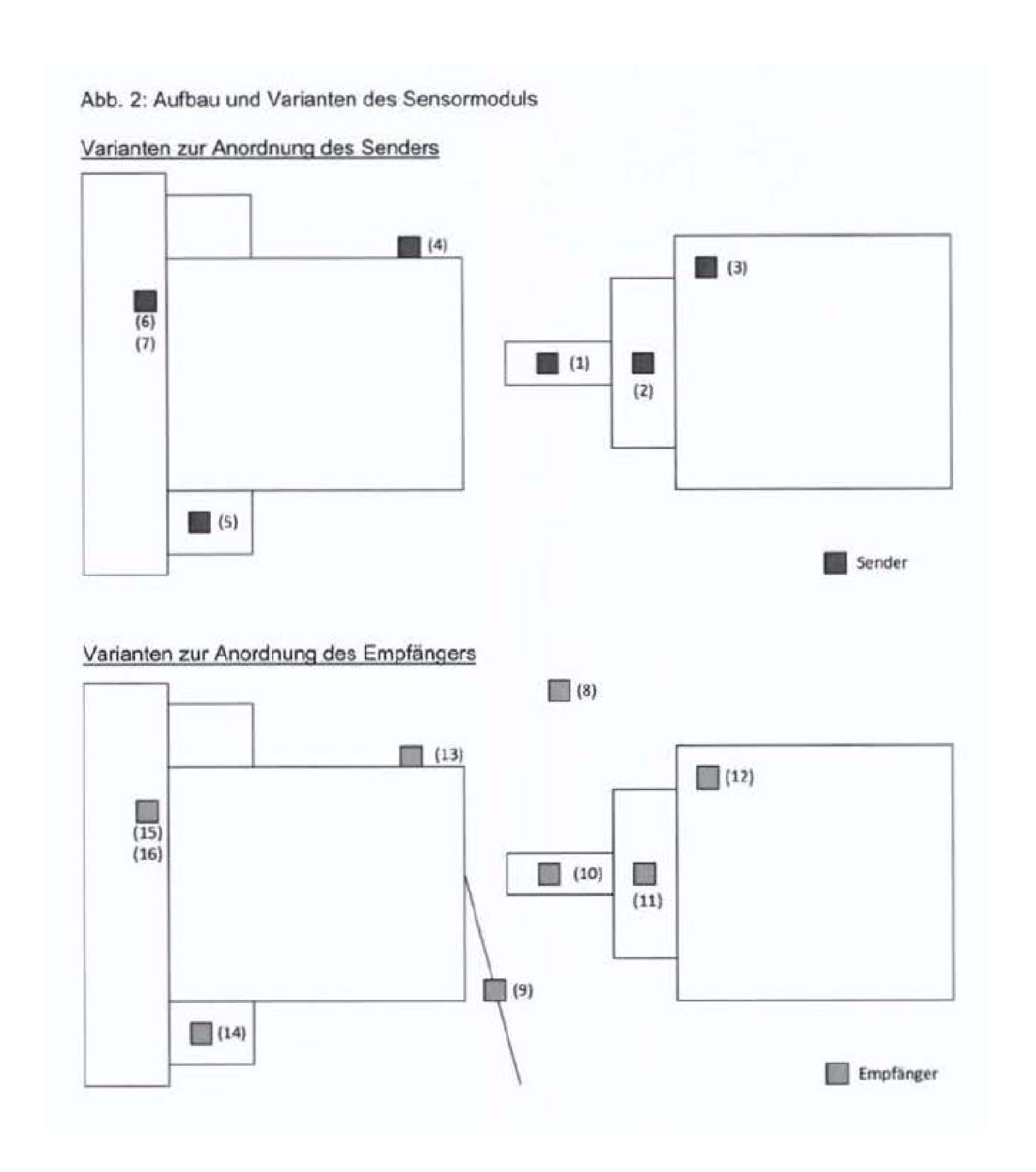
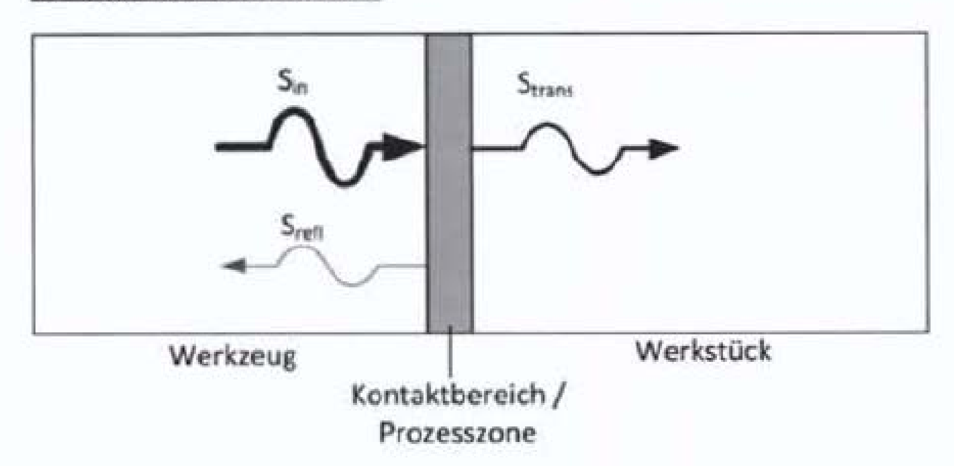
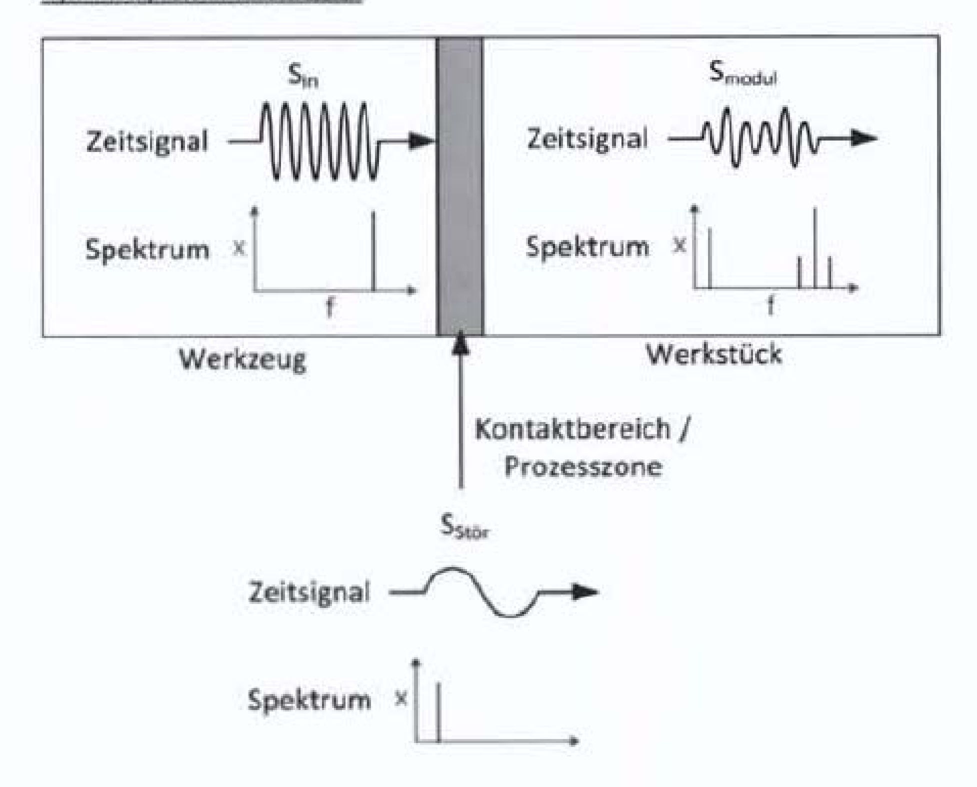

Abb. 2: Aufbau und Varianten des Sensormoduls
Varianten zur Anordnung des Senders
(4)
(6)
(7)
(5)
(3)
(1)
(2)
Sender
Varianten zur Anordnung des Empfängers
(8)
(13)
(15)
(16)
(14)
(9)
(12)
(10)
(11)
Empfänger

Abb. 3: Wirkprinzipien der schallbasierten Prozessüberwachung und –regelung

a) Prinzip der Transmission



b) Prinzip der Modulation



c) Prinzip der Kopplung

f_{res}

I II III IV

t

I

Werkzeug Werkstück

II

Werkzeug Werkstück

Kontaktbereich / Prozesszone

III

F F

Werkzeug Werkstück

Kontaktbereich / Prozesszone

IV

Werkzeug Werkstück

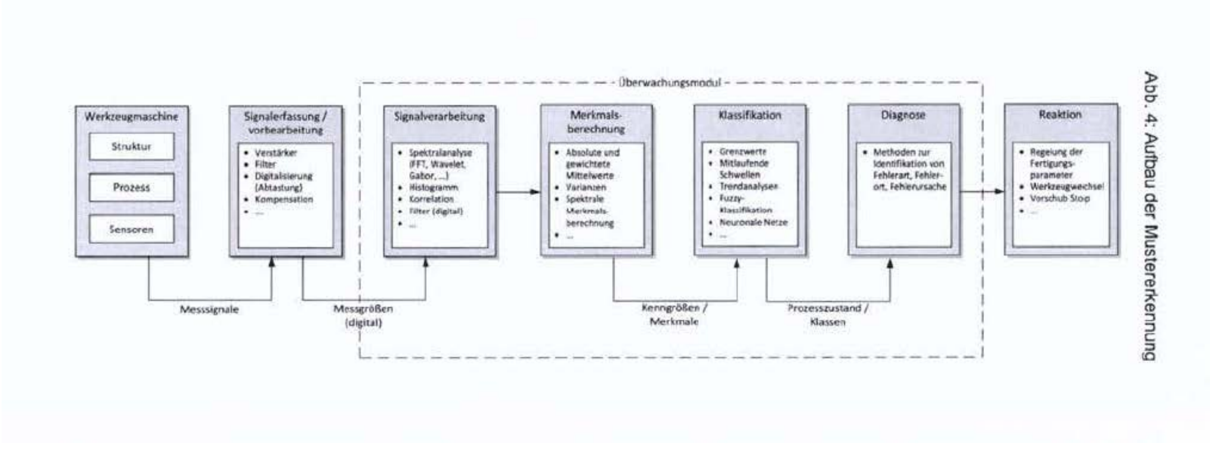


Abb. 4: Aufbau der Mustererkennung

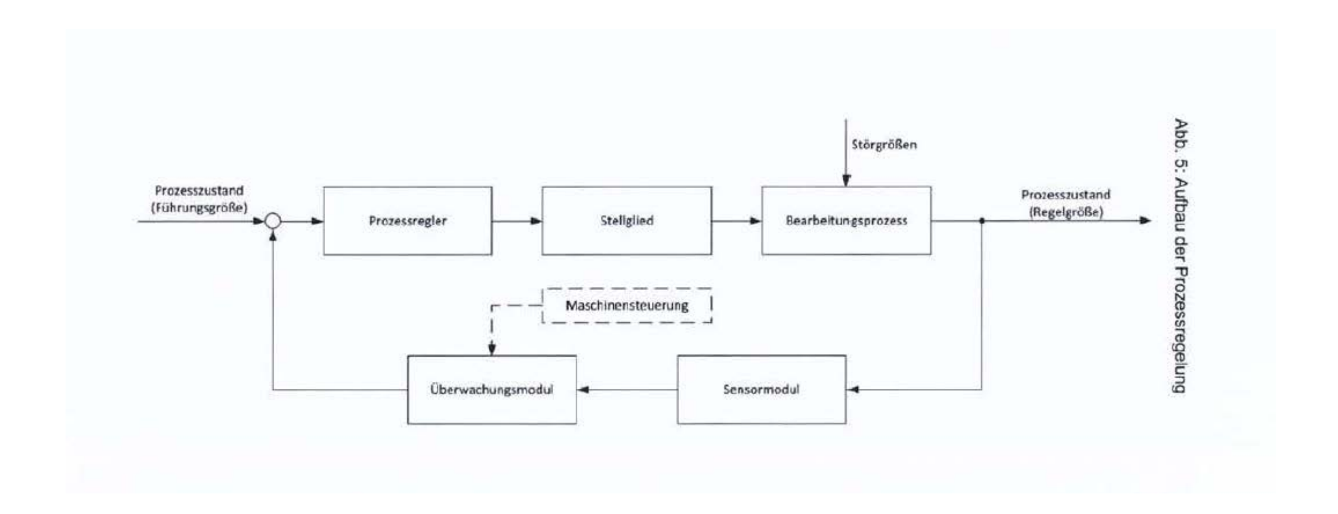


Abb. 5: Aufbau der Prozessregelung